

УДК 239.42:622.35

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-30>

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СПРЯМОВАНОГО РУЙНУВАННЯ КРИСТАЛІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА В КОМБІНОВАНОМУ РЕЖИМІ

Тітов Данил Андрійович,

аспірант кафедри відкритих гірничих робіт
Криворізького національного університету
ORCID ID: 0000-0002-0637-2329

Кальчук Сергій Володимирович,

кандидат технічних наук, доцент
Державного університету «Житомирська політехніка»
ORCID ID: 0000-0003-3179-2787

Робота присвячена математичному моделюванню процесу спрямованого руйнування гірської породи в режимі комбінованого навантаження: при сполученні статичного напруження середовища до рівня, передуючого інтенсивному некерованому за напрямом розростання в ньому мікротріщин, за допомогою невибухових руйнуючих сумішей (НПС), і з остаточним розколюванням по заданій площині субдинамічним нарощуванням напружень піроклинами. За даного режиму забезпечується повільне (7-20 годин) нарощування напружень до критичного рівня, понад якого в кристалічних середовищах починається спонтанний розвиток тріщин за типом ланцюгової реакції з повним псуванням блоків цінної продукції, запобігти чому передбачається на основі ідеї використання субдинамічної дії піроклина як тригера короткоповільного утворення відділяючої блок магістральної площини по лінії, заданій попередньо пробуреними в породі свердловинами або шпурами. Актуальність роботи зумовлена тим, що на практиці означена ідея цілком переконливо підтверджує свою доцільність, але потребує розробки відповідного теоретичного обґрунтування.

Методично це пропонується на основі структурних і безструктурних моделей, із застосуванням надійно апробованого статистичного розподілу Вейбулла. За цих умов передбачається системний комплексний підхід щодо побудови моделей процесу розвитку напружено-деформованого стану з мікро- та макроруйнуванням кристалічних порід. Встановлено, що формування тріщин відділення блоків мають відповідати анізотропії породних масивів. Обґрунтовано, що, оскільки процеси росту магістральних тріщин протікають за різними законами в звичайній та субдинамічній постановці задачі руйнування, їх доцільно описувати аналітично з комплексно-системним урахуванням синергетичної дії, що підвищить адекватність розроблених моделей.

Ключові слова: кристалічне середовище, природний камінь, руйнування породи, розколювання, напруження, динаміка, математична модель.

Titov Danil, Kalchuk Sergii. Mathematical modeling of directed destruction of crystalline medium in combined mode

The work is devoted to mathematical modeling of the process of directional fracture of rock in the combined loading mode: when combining static stress of the medium to a level preceding intensive uncontrolled growth of microcracks in it, using non-explosive destructive mixtures (NDM), and with final splitting along a given plane by subdynamic stress buildup by pyroclines. This mode provides a slow (7-20 hours) build-up of stresses to a critical level, above which spontaneous development of cracks begins in crystalline media by the type of chain reaction with complete damage to blocks of valuable products, which is expected to be prevented based on the idea of using the subdynamic action of pyrocline as a trigger for the short-delayed formation of a main plane separating the block along a line previously drilled in the rock by wells or boreholes. The relevance of the work is due to the fact that in practice the indicated idea quite convincingly confirms its feasibility, but requires the development of an appropriate theoretical justification.

Methodologically, this is proposed on the basis of structural and structureless models, with the use of reliably tested Weibull statistical distribution. Under the second conditions, a systematic complex approach is envisaged to build models of the process of development of the stress-strain state with micro- and macro-fracture of crystalline rocks.

The findings indicate that the formation of cracks separating blocks should correspond to the anisotropy of rock massifs. It is substantiated that, since the processes of growth of main crack proceed according to different laws in the usual and subdynamic formulation of the fracture problem, it is advisable to describe them analytically with a complex-system account of the synergistic action. Which will increase the adequacy of the developed models.

Key words: crystalline medium, natural stone, rock failure, splitting, stress, dynamics, mathematical model.

Вступ. Наразі гірничодобувна промисловість України, незважаючи на її інертність, доволі стрімко еволюціонує і останнє має конкретно регресивний характер, що зумовлюється насамперед негативними геополітичними процесами та тривалою війною з РФ, а також – радикальними змінами, як у світовій географії ресурсно-лідуючих центрів, так і в сировинних пріоритетах новітніх, насамперед ІТ-технологій на глобальному рівні, коли, за стрімкого розвитку рециклінгу металобрухту й уповільнення обсягів механічного виробництва, рудна частка в металургії чорних металів стабілізується, а подекуди навіть скорочується, все чіткіше виявляючи тенденції до розвороту гірництва від домінуючої нині залізорудної сировини до руд кольорових металів та рідкоземельних елементів. Не останню роль також у цьому відіграють і процеси розвитку урбаністики, коли в містобудуванні останнім часом радикально змінюються критерії архітектурно-естетичної якості будівель і спорудз переходом від прагматично-масового будівництва до індивідуалізовано вираженого творчого, яке є неможливим без високоякісних, довговічних оздоблювальних матеріалів, серед яких абсолютний пріоритет на усіх континентах належить природному каменю, і яким надзвичайно багатими є надра України.

Тому наведені вище обставини мають закладатися у фундамент промислової стратегії України стосовно сировинного її спрямування, щоб зберегти функціонування гірничодобувного комплексу як основи державної економіки й індустрії. Це є найбільш реальним шляхом виживання галузі за сучасної кризи, так як уможлиблюється високою адаптивною здатністю кар'єр-систем, навіть таких вузькоспеціалізованих об'єктів, як ГЗК, до відносно швидкої конверсії виробництва з широкою диверсифікацією мінеральної продукції за рахунок переходу до комплексного освоєння надр, з яких побіжно і неминуче видобуваються мільйони кубометрів сировини, подекуди набагато ціннішої за залізну руду (1 м³ граніту, наприклад, коштує \$500-900), але яка безповоротно втрачається у змішаних відвалах, повністю зіпсована вибуховими рудними технологіями.

Актуалізація розглянутої проблеми зумовлюється саме технологічними чинниками, враховуючи особливу вразливість блокової сировини до методів вилучення з масивів, що й вмотивувало дане дослідження.

Сама ж технологія спрямованого руйнування каменю по заданим площинам відома з давніх часів і принципи її багато в чому збереглися до наших днів, адже древні люди, як і зараз,

видобували в породі ряди отворів для напруження її по площині відколу, тільки робили це за допомогою забивання дерев'яних кілків з наступним змочуванням їх для набухання. Сучасні аналоги й наразі є найбільш поширеними способами щадного виколування кам'яних блоків, тільки шпури або свердловини в породі вибураються високопродуктивними верстатами, а замість дерев'яних кілків використовуються або механізовані клинові пристрої (гідроклини, піроклини тощо), або твердіючі з розширенням невибухові руйнуючі суміші (НРС) чи генератори тиску хімічних речовин (ГТХ) – «повільного вибуху». Але загалом на більшості гранітних кар'єрів завдяки своїй технологічній простоті превалює відбивання блоків з допомогою буро-вибухових робіт (БВР) із застосуванням шпурового буріння в сполученні з пороховими зарядами. Однак даний спосіб, навіть при використанні не бризантних а металевих зарядів димного пороху, не виключає вибухове ушкодження цінної продукції, до того ж порох здатний до самозаймання від тертя з породою при заряджанні шпурів. Існує декілька й умовно неруйнуючих способів видобутку, але вони обмежуються або незначними розмірами блоків (нарізання дисковими пилами), або низькою продуктивністю та відносною складністю окремих операцій (відрізання крупних блоків канатними пилами), або високою витратністю та відходністю (суцільне прорізання відокремлюючих щілин термоструменевими пальниками).

Усі зазначені способи характеризуються різною динамікою процесу протікання створюваних зусиль розколу [1], що є головним чинником забезпечення якості продукції, тому цільовим завданням даного дослідження є пошук прийняттого оптимуму (компромісу між витратами технологічними та втратами сировинними) шляхом аналізу ефективності сполучення варіацій розглянутих способів, у даному випадку – поєднання НРС з піроклинами.

Методи та методики дослідження. Методологічно дане дослідження реалізується шляхом однооб'єктного паралельного моделювання розвитку напружено-деформованого стану кристалічного пружно-крихкого мінерального середовища в режимах статичного (НРСами) та субдинамічного (піроклинами) його навантаження. Розроблене рішення вже підтвердило свою ефективність, але в промисловій практиці впровадження на вітчизняних кар'єрах не набуває внаслідок відсутності належного та доступного для інженерного користування методологічного забезпечення, враховуючи, що воно йде набагато далі не тільки прикладних задач

гірничого виробництва, але й суттєво розширює можливості самої геомеханіки.

Існуючі методики розрахунку параметрів технології спрямованого відколу переважно базуються на теорії статичного руйнування порід, що є гальмом для технологій видобування каменю методами, відмінними від статичних. Тому розробка математичної моделі, що адекватно описує протікання процесів комбінованого спрямованого руйнування каменю в двостадійному режимі та визначення основних етапів цих процесів за означених умов має вельми актуальне значення.

Більшість з існуючих теорій забезпечують достовірність лише для обмеженої групи порід, а для опису динаміки процесу руйнування кристалічного облицювального каменю є не достатньо адекватними, оскільки не враховують повною мірою системно складних процесів комбінованого руйнування полімінерального середовища, які вимагають враховувати ще й анізотропні його властивості. Тому, враховуючи зазначене, постає необхідність удосконалення математичного моделювання процесів спрямованого руйнування каменю, які об'єднують процеси мікро- та макроруйнування, а також утворення магістральних тріщин в субдинамічній постановці задачі. Саме тому на першому етапі дослідження було проаналізовано нові методики щодо розколювання блочного масиву з допомогою НРС та виділено найефективніші

з них [2]; на другому – визначено особливості крихкого руйнування природного каменю як функції часу (тривалості) в даному контексті субдинамічної задачі на основі енергетичної теорії Журкова. Третій етап обґрунтовує логіку ідеї комбінованого сполучення різних режимів спрямованого руйнування каменю й параметричної оптимізації процесу, після чого слідує конструктивна розробка реалізації метода.

Такий методологічний підхід дозволив виділити найбільш сумісні між собою варіанти режимів статичного та субдинамічного навантаження кристалічного середовища і розробити технічне рішення задачі спрямованого його руйнування в комбінованому режимі, ефективність якого полягає в максимізації монолітності й мінімізації втрат блокової продукції.

Результати та дискусії. Конкретно задача дослідження стосується нового способу відокремлення кам'яних блоків від масиву (рис. 1), який полягає в попередньому напруженні масиву НРС, розміщених у вибурених по площині заданого розколу шпурах, але не до рівня напруг відколу (близько до якого починають стрімко некеровано розростатися мікротріщини, псуючи блок), а до моменту початку такого роду «ланцюгової реакції», після чого спрацьовують піроклини і забезпечують появу магістральної тріщини чітко по заданій площині уже в субдинамічному режимі.

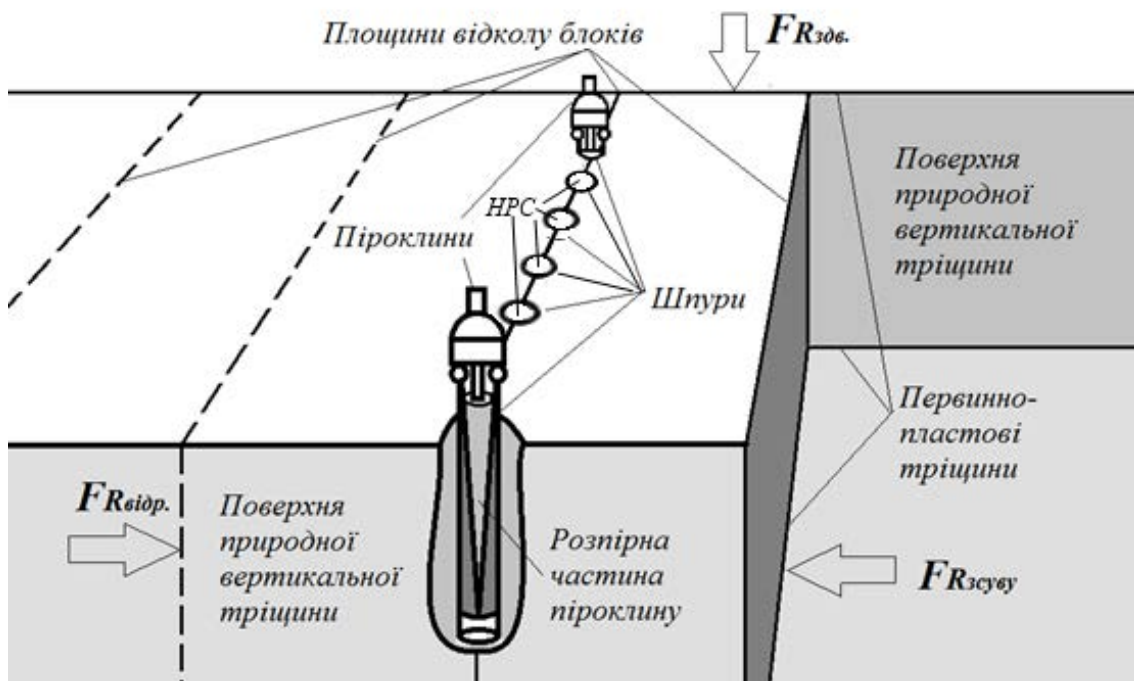


Рис. 1. Просторова орієнтація природних і штучних площин в породному масиві та схема шпурів за комбінованого способу видобутку блоків

Як відзначалося вище, перший етап стосується статичної фази навантаження породи з допомогою НРС, і тут ми спираємося на достатньо прості й одночасно надійні підходи, наведені в [3].

На сьогоднішній день відомими є понад 120 різних сумішей та композицій НРС [4-6], головними недоліками більшості з яких є їх імпортованість, ноу-хау складу, використання як добавок рідкісних і дорогих речовин, тривалий час руйнування (12-24 год.), обмежений температурний режим та умови застосування тощо. У зв'язку з цим ми й звернулися до [3], де враховано необхідність розробки дешевої та якісної НРС з використанням компонентів із місцевої сировини з меншою витратою часу на руйнування гірських порід.

Методично в роботі [3] використано результати теоретичних, лабораторних й експериментальних досліджень із застосуванням теорії систем і системного аналізу, математичного моделювання, теорії створення високого внутрішнього тиску в шпурах тощо. Аналітично застосовується теорія Гріффітса-Ірвіна, і це є цілком виправданим, так як вона не вимагає великої кількості експериментальних даних для розрахунку і задовільно описує руйнування породи за рахунок розростання одиночної тріщини в магістральну [7; 8], що дає підставу вибрати оптимальне просторове положення площини відколу.

При використанні НРС первинні тріщини можуть утворюватися у довільному місці шпуру та розвиватися у будь-якому напрямі. Тому розгляд утворення щілини виключно як результат дії тангенціальної напруги σ_θ в точці А, розташованої в площині щілини на рівній відстані від сусідніх шпурів (рис. 2) без урахування надзвичайно важливої властивості, притаманної усім без винятку гірським породам, – механічної анізотропності й тісно пов'язаної з нею системної тріщинуватості, на наш погляд, є не зовсім коректним, оскільки первинні мікротріщини – це саме ті концентратори напружень, які головним чином і провокують розростання їх до макrorівня, природним результатом чого зрештою й стають системні тріщини.

До речі, при видобутку природного каменю системну тріщинуватість масиву завжди використовують продуктивно, формуючи по них площини відокремлення блоків. До того ж в модель закладається ортогональний принцип взаємного положення тривимірних площин, що реалізується дуже рідко: коректніше мову вести про субортогональні побудови, просторову геометрію яких доволі просто визначати, наприклад, за теоремою косинусів тощо.

В цілому ж є прийнятним твердження, що істотну роль в механізмі формування магістральної щілини відіграють радіальні напруги від сусідніх шпурів, які геометрично складаються в площині, що перетинає її перпендикулярно

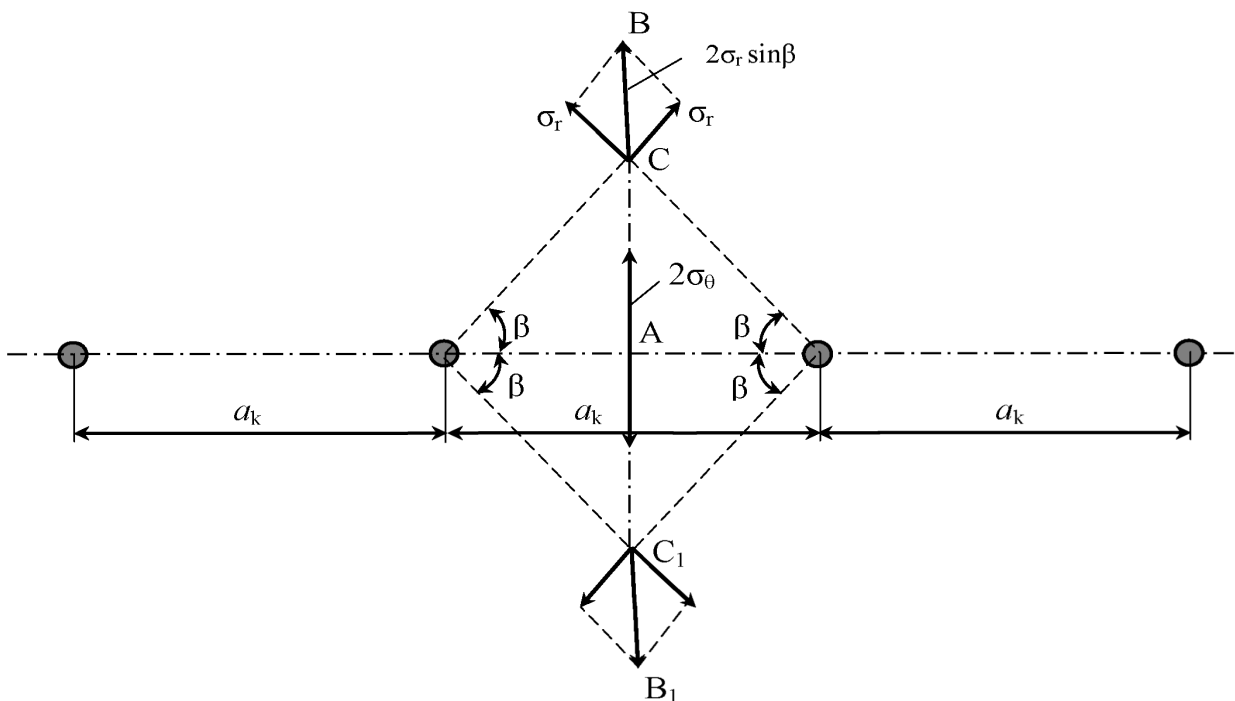


Рис. 2. Вихідна схема до розрахунку відстані між шпурами з використанням НРС [3]

на відстані від сусідніх шпурів. Ці напруги також створюють розтягуючі зусилля в площині щілини, а завжди необхідно знати витрати енергії на розсування стінок щілини після утворення магістральної тріщини, що є необхідним для строплення блоків.

Щілина виникає в масиві під дією розтягуючих напруг σ_θ в точці А і симетричних, спрямованих в різні сторони розтягуючих напруг в точках С і С₁, що формуються в результаті геометричного складання радіальних напруг стиснення в цих точках (рис. 2).

В результаті [3] запропоновано формулу визначення ефективної відстані між шпурами a_k при використанні НРС для рівного відриву гірських порід, яку ми рекомендуємо модифікувати з урахуванням викладених вище міркувань відношенням межі міцності породи паралельно шаруватості ($\sigma_{||}$) і перпендикулярно (σ_{\perp}), що певною мірою компенсує можливу системну помилку в розрахунках a_k

$$a_k = 0,17d_w \left(\frac{\sigma_{||}}{\sigma_{\perp}} \right) \left[P(t) \left(0,85 + \frac{\mu}{1-\mu} \right) I(\sigma'_p + \sigma_h) \right]^{\frac{2}{3}}, \text{ м} \quad (1)$$

де d_w – діаметр шпуру, м; $P(t)$ – стискаюча напруга, зумовлена дією НРС на стінки шпуру, МПа; μ – коефіцієнт Пуассона; σ'_p – межа

міцності породи при розтягуванні з урахуванням коефіцієнта структурного ослаблення даного масиву, МПа; σ_h – додаткові напруги, необхідні для переміщення стінок щілини на деяку величину $h_{щ}$, та її розкриття, МПа. Крім того, використовуючи встановлені [3] аналітичні залежності зміни відстані a_k між шпурами з НРС від діаметра шпуру, стискаючої напруги від дії НРС на стінки шпуру, коефіцієнта Пуассона, межі міцності породи при розтягуванні, а також додаткового напруження, необхідного для переміщення стінок блоку на деяку відстань для розкриття тріщини з метою забезпечення можливості строповки останнього, ми побудували суміщений графік даних залежностей, що дало можливість виявити смугу, в межах якої криві графіків виявляють найвищу щільність, яку ми назвали пріоритетним діапазоном, оскільки він дозволяє виключити з аналізу здебільшого малоймовірні ситуації та починати з найвірогідніших (рис. 3).

Таким чином, ми пропонуємо визначати відстань між шпурами (свердловинами) з урахуванням впливу на формування магістральної тріщини відколу анізотропії породи, оскільки в більшості гірських порід це значною мірою впливає не тільки на енергетичні показники

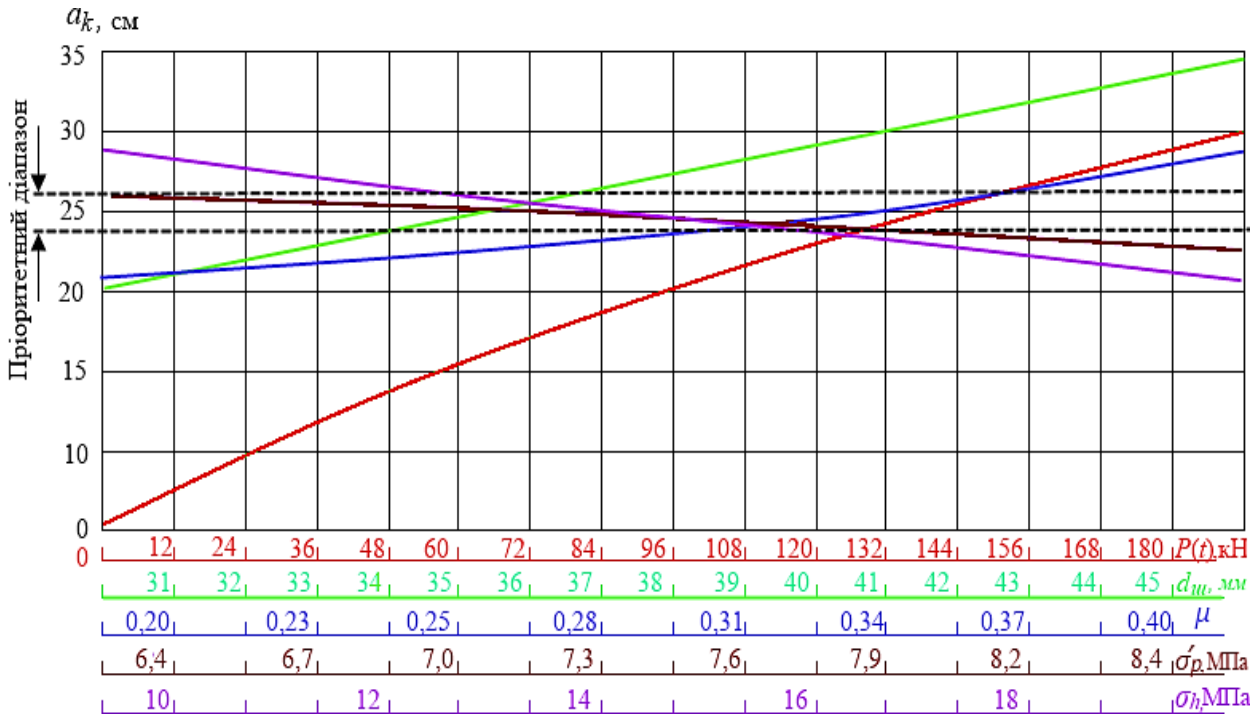


Рис. 3. Зміна відстані між шпурами залежно від d_w – діаметра шпуру, м; $P(t)$ – стискаючої напруги, зумовленої дією НРС на стінки шпуру, МПа; μ – коефіцієнту Пуассона; σ'_p – межі міцності породи при розтягуванні з урахуванням коефіцієнта структурного ослаблення масиву, МПа; σ_h – додаткові напруги, необхідні для переміщення стінок щілини на величину $h_{щ}$, та її розкриття, МПа

технології, але й на якість кінцевої продукції. Фактично пропонується уведення в розрахункові формули відношення максимальної та мінімальної векторної міцності породи, що у більшості випадків відповідає не тільки напрямкам паралельно та перпендикулярно явній або прихованій шаруватості останньої, але й домінуючій орієнтації тріщин субмеридіональних та субширотних систем, що значно спрощує проектування бурових робіт [9].

Стосовно другої субдинамічної фази навантаження породного масиву з остаточним відокремленням блоків від масиву, то варто розглянути конструкцію піроклину [10] як основного засобу-тригера створення чітко орієнтованих розпирних зусиль високої інтенсивності в субдинамічному режимі.

На даний момент нами удосконалюється піроклин (рис. 4), який вирішив проблему неприємного до того для гірничої практики діапазону між статичним та динамічним (вибуховим) режимами.

Головним недоліком даного пристрою є придатність його застосування виключно у вертикальних свердловинах внаслідок виливання горючої рідини в разі нахилу, на усунення чого й спрямоване удосконалення даної конструкції нами.

До винаходу даного пристрою практично не було шляхів узгодження протилежних за своєю суттю механізмів реалізації двох названих режимів, які, з причини існувавшего тривалий час розриву в доступних динамічних діапазонах керованого навантаження середовищ, не зовсім виправдано розглядалися як альтернативні. Розглянутий нижче варіант ілюструє один з підходів у спробах створення придатної до використання математичної моделі на шляху розвитку теоретичних основ субдинамічної механіки.

Серед теорій, що розкривають особливості крихкого руйнування природного каменю як функції часу заслуговує на особливу увагу в даному контексті енергетична теорія Журкова [1], за якою

$$t_i = t_p \exp\left(\frac{E_a - v_a \sigma}{kT}\right), \quad (2)$$

а також степенева залежність тривалості від навантаження (2):

$$t_i = t_p \left(\frac{\sigma}{\sigma_p}\right)^{-n} \exp\left[\frac{E_a}{kT}\right] \quad (3)$$

Це – усереднені значення статичної тривалості за константних значень напруг в часі. За субдинамічної ситуації ці вирази стають рівняннями швидкості росту тріщини (4), (5):

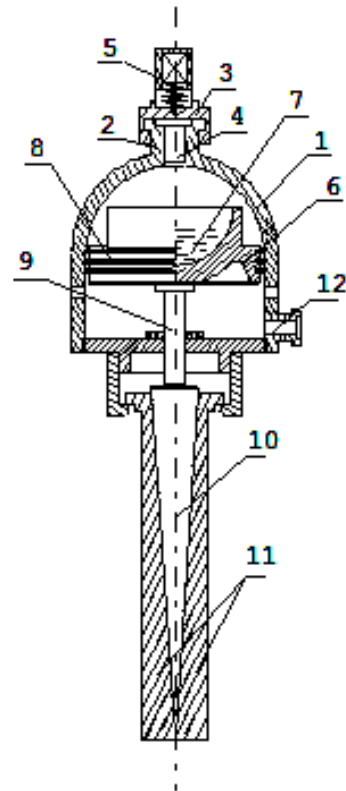


Рис. 4. Устрій піроклину: 1 – корпус; 2, 12 – горловини; 3 – затвор; 4 – піропатрон; 5 – ініціатор; 6 – поршень; 7 – горюча рідина; 8 – компресійні кільця; 9 – силовий шток; 10 – розпирний клин; 11 – розсувні щоки

$$v_c = v_e \exp\left(-\frac{E_a - bK_1}{kT}\right); \quad (4)$$

$$v_c = v_e \left(\frac{K_1}{K_S}\right)^n \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right); \quad (5)$$

де K_1 – коефіцієнт інтенсивності напружень в межах закону Гука.

В лінійній теорії пружності ці співвідношення задовільно апроксимуються до стадії прискореного росту тріщини. А так як за квазістатичного руйнування полімінеральні кристалічні породи є неоднорідним середовищем, для нього процес руйнування макроскопічних твердих тіл відбувається за статистичним розподілом Вейбулла.

$$P(\sigma) = 1 - \exp\left[-(\sigma/\sigma_0)^n\right] \quad (6)$$

В теорії феноменологічних моделей руйнування розростання тріщин розглядається, як стрибкоподібний випадковий процес, а задача росту тріщин:

$$\frac{\partial V(L, t/L_0)}{\partial t} = -Z(L, \sigma)V + \int_0^{L-L_0} \omega(l)Z(L-l, \sigma)V(L-l, t/L_0)dl,$$

$$V(L, t/L_0) = \sigma + (L-L_0), \quad (7)$$

де $V(l, t/L_0)$ – щільність розподілу початкових розмірів тріщин L_0 ; $Z(L, \sigma)$ – середній час очікування елементарного акту росту тріщини; $\omega(l)$ – щільність розподілу довжини стрибків. Фізична суть цієї математичної моделі полягає в тому, що елементарний акт росту тріщини є складним багатоступеневим процесом, для опису якого на різних етапах необхідно залучати енергетичну модель (2), (3), модель розподілу Вейбулла (6) та безструктурну модель (7).

Застосовуючи дані функції до залежностей (4) і (5), одержано значення середніх швидкостей росту тріщин при субдинамічному руйнуванні порід:

$$Z(L, \sigma) = Z_0 \left(\frac{bK_1}{kT} \right)^m \exp \left(-\frac{E_a - bK_1}{kT} \right) \quad (8)$$

$$Z(L, \sigma) = Z_0 \left(\frac{K_1}{K_s} \right)^m \exp \left(-\frac{E_a}{kT} \right) \quad (9)$$

Для аргументу функції розподілу Вейбулла сумарної площі елементарних контактів, які мають певні незалежні значення межі міцності на розтяг σ , є функція щільності розподілу $f(\sigma)$, а сумарна площа зразка подається у вигляді інтегралу від розподілу щільності в діапазоні від 0 до σ_{\max} (10):

$$S = \int_0^{\sigma_{\max}} f(\sigma) d\sigma \quad (10)$$

За умови постійного навантаження породи в процесі мікроруйнування бере участь тільки частина міжмінеральних зв'язків, міцність яких дорівнює, або є меншою, ніж напруження, зумовлене зовнішнім впливом. Виходячи з цього, більшому зовнішньому навантаженню відповідає більша кількість елементарних міжмінеральних зв'язків, що залучаються до

процесу руйнування, що узгоджується з явищем динамічної міцності – короткотривалої здатності витримувати більші навантаження, ніж за статичних випробувань.

Таким чином, дія статичного навантаження протягом більш тривалого часу зумовлює мікроруйнування і зменшення площі контакту (накопичення пошкоджень). Умова рівноважного стану забезпечується у випадку рівності сил, що діють на породу ззовні, та сил протидії мінеральних зв'язків: $F_{ext} \geq F_{int}$.

Даний вираз через інтеграл щільності розподілу Вейбулла (11):

$$\sigma \int_0^{\sigma_{\max}} f(\sigma) d\sigma \geq (\sigma + d\sigma) \left(\int_0^{\sigma_{\max}} f(\sigma) d\sigma - \int_0^{\sigma} f(\sigma) d\sigma \right) \quad (11)$$

За певного значення σ виникає стан критичної рівноваги, а його перевищення зумовлює некероване остаточне руйнування каменю (12):

$$\sigma_{lim} = (\sigma + d\sigma) \quad (12)$$

Висновки. Оскільки загальний процес спрямованого руйнування кристалічних порід складається з ряду складних процесів мікро- та макроруйнування, які протікають паралельно, але, разом з тим, є взаємозалежними, а також з найбільш значимого в даному контексті процесу росту магістральних тріщин, і що ці процеси протікають за різними законами в звичайній та субдинамічній постановці задачі руйнування, їх доцільно описувати аналітично з комплексно-системним використанням енергетичної теорії руйнування, статистичного розподілу та теорії безструктурних моделей. Разом з тим означений підхід щодо аналітичного опису процесу субдинамічного руйнування порід вимагає в подальшому встановлення невідомих поки що допустимих границь застосування кожної окремої аналітичної залежності, відповідно до етапів і динаміки навантаження та напруження середовища, аж до повного його руйнування для забезпечення адекватності такого моделювання.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Шашенко О. М., Пустовойтенко В. П. Механіка гірських порід : підручник. Київ : Новий друк, 2004. 400 с.
2. Rios J. V. Practical application of expanding cements for crushing and dredging rocks. *Rocas y minerales*. 1983. Vol. 12, No. 143. P. 20–21, 24–26.
3. Заїров Ш. Ш., Равшанова М. Х., Тагаєв І. А., Худойбердієв О. Ж. Статичний метод руйнування гірських порід з використанням невибухової руйнівної суміші. *Геотехнічна механіка*. 2021. № 156. С. 24–35. DOI: 10.15407/geotm2021.156.024.
4. Пат. 59940 Україна, МПК С04В 7/00. Невибухова руйнівна речовина НРР-80 / Грибко В. Ф., Щєбликін С. В., Палей А. В. ; заявник Грибко В. Ф. № 2002129862 ; заявл. 09.12.2002 ; опубл. 15.07.2005, Бюл. № 7. 6 с.
5. Eckler H. O., Bergholt W., Peneyal M., Korth D. Method of fracture of brittle materials : Pat. 246982 German Democratic Republic. 1987.

6. Crushing agent : Pat. 57-187044 Japan, B02C 19/18 / Aitou A., Nakatani S., Miwa A. ; priority 12.05.1981 ; publ. 17.11.1982.
7. Griffith A. A. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*. 1921. Vol. 221. P. 163–197. DOI: 10.1098/rsta.1921.0006.
8. Irwin G. Fracture dynamics. *Encyclopedia of Physics*. Vol. IV / ed. S. Flügge. Berlin : Springer, 1958. P. 551–590.
9. Скачков А. О. Просторова спрямованість енергії комбінованих свердловинних зарядів за диференційованого енергонасичення масиву порід. *Розробка родовищ корисних копалин : збірник наукових праць / Національний гірничий університет*. 2018. № 55. С. 88–96.
10. Пат. 98063084 Україна. Спосіб створення регульованих зусиль для розколу гірських порід та пристрій для його здійснення / Жуков С. О. ; опубл. 16.04.2001.
11. Гнеденко Б. В. Курс теорії ймовірностей. *Київ : ВПЦ Київський університет*, 2010. 464 с.
12. Cho S. H., Kaneko K. Influence of the applied pressure waveform on the dynamic fracture processes in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2004. Vol. 41. P. 771–784. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2004.03.134.

REFERENCES:

1. Shashenko, O. M., & Pustovoitenko, V. P. (2004). *Mekhanika hirs'kykh porid [Rock mechanics]: pidruchnyk*. Kyiv: Novyi druk. [in Ukrainian]
2. Rios, J. V. (1983). Practical application of expanding cements for crushing and dredging rocks. *Rocas y minerales*, 12(143), 20–21, 24–26.
3. Zairov, Sh. Sh., Ravshanova, M. Kh., Tahaiev, I. A., & Khudoiberdiiev, O. Zh. (2021). Statychnyi metod ruinuвання hirs'kykh porid z vykorystanniam nevybukhovoї ruivnoi sumishi [Static method of rock fragmentation using a non-explosive expansion compound]. *Heotekhnichna mekhanika – Geotechnical Mechanics*, (156), 24–35. <https://doi.org/10.15407/geotm2021.156.024> [in Ukrainian]
4. Hrybko, V. F., Shcheblykin, S. V., & Palei, A. V. (2005). *Nevybukhova ruivna rechovyna NRR-80 [Non-explosive expansion substance NRR-80]*. Ukraine Patent No. 59940. [in Ukrainian]
5. Eckler, H. O., Bergholt, W., Peneyal, M., & Korth, D. (1987). *Method of fracture of brittle materials*. German Democratic Republic Patent No. 246982.
6. Aitou, A., Nakatani, S., & Miwa, A. (1982). *Crushing agent*. Japan Patent No. 57-187044.
7. Griffith, A. A. (1921). The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*, 221, 163–197. <https://doi.org/10.1098/rsta.1921.0006>
8. Irwin, G. (1958). Fracture dynamics. In S. Flügge (Ed.), *Encyclopedia of Physics* (Vol. IV, pp. 551–590). Berlin: Springer.
9. Skachkov, A. O. (2018). Prostorova spriamovanist enerhii kombinovanykh sverdlovynnykh zariadiv za dyferentsiiovanoho enerhonasychnennia masyvu porid [Spatial orientation of the energy of combined borehole charges under differentiated energy saturation of the rock mass]. *Rozrobka rodovys'ch korysnykh kopalyn – Mining of Mineral Deposits*, (55), 88–96. [in Ukrainian]
10. Zhukov, S. O. (2001). *Sposib stvorennia rehuliovanykh zusyly dlia rozkolu hirs'kykh porid ta prystrii dlia yoho zdiisnennia [Method for creating adjustable forces for rock splitting and a device for its implementation]*. Ukraine Patent No. 98063084. [in Ukrainian]
11. Hniedenko, B. V. (2010). *Kurs teorii imovirnostei [A course in probability theory]*. Kyiv: VPC Kyivskiy universytet. [in Ukrainian]
12. Cho, S. H., & Kaneko, K. (2004). Influence of the applied pressure waveform on the dynamic fracture processes in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, 771–784. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.03.134>



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 09.04.2026
 Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.05.2026
 Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026